



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2507669

引用格式:李鑫, 亓宇航, 肖立鹏, 等. 隧道多节理岩体聚能爆破效果及影响因素[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(27): 11908-11917.

Li Xin, Qi Yuhang, Xiao Lipeng, et al. Effects and influencing factors of energy-gathering blasting in multi-jointed rock masses of tunnels [J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11908-11917.

隧道多节理岩体聚能爆破效果及影响因素

李鑫^{1,2}, 亓宇航^{1,2}, 肖立鹏^{1,2}, 田园野^{1,2}, 李强^{1,2*}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 石家庄 050043)

摘 要 为探究多节理岩体隧道聚能爆破中超欠挖现象的关键影响因素,采用有限元数值模拟结合正交试验法,综合考量节理间距、节理数量、节理倾角、节理厚度、地应力和炮孔间距共 6 个因素,系统研究上述因素对超欠挖量的影响规律,并通过极差分析确定了影响超欠挖的主控因素。结果表明:地应力、炮孔间距和节理倾角是导致超欠挖问题的三个主要因素;当地应力为 4 MPa 时,围岩损伤范围较小,同时可保证炮孔间裂纹充分贯通;当炮孔间距设置为 60 cm 或 80 cm 时,可对超欠挖实现有效控制;较大的节理间距更有利于爆破裂纹的定向扩展,能够显著优化超欠挖的控制效果。本研究可为多节理岩体条件下的聚能爆破施工提供参考依据,同时为优化爆破参数、改进爆破方法以及形成规整良好的爆破轮廓线提供指导。

关键词 聚能爆破; 正交试验; 多节理; 超欠挖

中图分类号 U455.6; **文献标志码** A

Effects and Influencing Factors of Energy-gathering Blasting in Multi-jointed Rock Masses of Tunnels

LI Xin^{1,2}, QI Yu-hang^{1,2}, XIAO Li-peng^{1,2}, TIAN Yuan-ye^{1,2}, LI Qiang^{1,2*}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

[Abstract] In order to investigate the key factors influencing over-under-excavation in multi-jointed rock mass tunneling with shaped charge blasting, the finite element numerical simulation and orthogonal test method were used. Six factors, including joint spacing, joint number, joint dip angle, joint thickness, *in-situ* stress, and borehole spacing, were comprehensively considered to study their effects on the over-under-excavation volume. Range analysis was then employed to determine the main controlling factors. The results show that *in-situ* stress, borehole spacing, and joint dip angle are the primary factors causing over-under-excavation. When the *in-situ* stress is 4 MPa, the damage range of the surrounding rock is relatively small and crack propagation between boreholes can be ensured. Borehole spacings of 60 cm or 80 cm can effectively control the occurrence of over-under-excavation. A larger joint spacing is conducive to the directional propagation of blasting cracks, thereby significantly optimizing the over-under-excavation control effect. It is concluded that this study can provide a reference for shaped charge blasting construction in multi-jointed rock masses, offering guidance for optimizing blasting parameters, improving blasting methods, and forming good blasting contours.

[Keywords] shaped charge blasting; orthogonal test; multi-joint; over-under-excavation

钻爆法施工是目前隧道掘进的主要手段,具有作业速度快、施工灵活、成本低等优势,但钻爆法在隧道掘进过程中极易造成超欠挖和塌方事故。为了减少超欠挖情况的出现,聚能爆破技术被广泛应用于隧道开挖^[1]。该技术可促进炮孔间的爆生裂纹贯穿多条节理并实现成缝贯通,减弱围岩损伤,确保形成规整合理的爆破轮廓面。近年来,国内外学者围绕聚能爆破在多节理岩体中的爆破效果及超欠挖控制等方面开展了大量研究。

在聚能爆破机理与应用方面,Xu 等^[2]利用 LS-DYNA 软件建立了多孔聚能爆破和传统爆破的数值模型,对聚能爆破的炮孔间距、炮孔直径等参数进行了优化,研究结果表明聚能爆破对围岩损伤较小,优化炮孔参数后,可显著降低对保留岩体的破坏和扰动。杨洪印等^[3]对比研究了多节理隧道中聚能爆破与传统光面爆破的效果,发现聚能爆破可使超欠挖量平均减少 1 090 cm²,特别是在节理与炮孔连线呈 45°夹角时,优化效果最为显著,较光面

收稿日期: 2025-11-04 修订日期: 2026-03-27

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(236Z5405G);河北省重点研发计划(22375412D)

第一作者: 李鑫(1989—),男,汉族,陕西商洛人,博士,讲师。研究方向:岩土体节理特性及其环境效应。E-mail: xinli@stdu.edu.cn。

* 通信作者: 李强(1979—),男,汉族,河南林州人,博士,教授。研究方向:岩土工程理论及应用。E-mail: anuoli@163.com。

爆破减少超欠挖 1 161.4 cm²。李兴全等^[4]系统总结了聚能水压光面爆破技术的发展历程与应用现状,从切缝药包作用机理、参数优化等方面验证了该技术在隧道掘进中的应用优势。这些研究充分证实了聚能爆破技术在控制超欠挖方面的优越性。任士房等^[5]基于聚能水压光面爆破的聚能效应原理,研究了不同级别围岩下聚能爆破的效果,研究结果表明采用聚能水压光面爆破,能有效降低爆破振动对围岩的扰动,起到降本增效的效果。

由于天然岩体中普遍存在节理、断层等构造,这些构造会改变爆破裂纹的扩展路径,影响爆破效果,从而使得爆破超欠挖问题变得更为复杂。Luo 等^[6]综述了节理岩体隧道爆破损伤控制的研究进展,并通过数值模拟量化了节理几何特征对爆破响应的影响,发现炮孔-节理距离是控制损伤分布的首要因素,45°节理倾角会产生最严重的损伤各向异性。马泗洲等^[7]采用显式动力学数值模拟结合流固耦合技术,系统研究了围压与爆破耦合作用下节理岩体的裂纹扩展行为,揭示了节理面与非静水压力对裂纹扩展的导向作用机制,发现拉伸裂纹在爆破初期主导节理尖端损伤,而剪切裂纹在后期占主导地位。Li 等^[8]通过数字孪生方法对隧道掌子面进行实时监测,结合动态有限元模拟,揭示了节理诱导超挖的机制,发现节理会导致爆破轮廓线偏离炮孔连线,反射应力波形成的破碎区是超挖的主要成因。Wang 等^[9]采用正交数值试验方法研究了岩体结构对光面爆破质量的影响,研究结果表明对于块状完整构造和碎裂构造,孔间距对爆破质量的影响最大;而在节理发育岩体中,节理面的倾角和间距对光面爆破质量影响显著。Rong 等^[10]在不同节理厚度、节理角度和地应力条件下,对爆生裂纹扩展和爆破损伤的影响开展了数值模拟研究,结果表明初始地应力场的压应力不利于爆破裂纹的萌生和扩展,而节理的存在对裂纹扩展具有明显的引导和促进作用。Huang 等^[11]进行了节理岩体缺口孔爆破的数值模拟和现场实验,分析了裂纹扩展随节理角度的变化规律,研究结果表明节理倾角较小时,裂纹扩展受节理影响较大,裂纹沿垂直节理面方向延伸;当倾角为 60°、75°和 90°时,孔间会形成笔直完整的贯通裂纹。李国庆等^[12]通过数值模拟方法研究了地应力和节理对岩体爆破效果的影响,发现地应力对节理岩体隧道爆破时的裂纹扩展具有抑制作用,且会在节理处出现严重超挖现象。刘浩杉等^[13]基于 PFC 软件构建了考虑地应力与随机节理网络耦合的爆破模型,结果表明:节理密度、埋深(地应力)和装药直径是控制高地应力下随机节

理岩体爆破响应的关键因素。

在爆破参数优化方面,伍军^[14]对节理倾角为 60°时的隧道周边孔进行参数优化,对爆破岩体损伤及超欠挖进行了分析,结果表明 60°节理倾角时,将周边孔孔距由 55 cm 调整为 45 cm,并减少单孔装药量,可有效控制隧道超挖量;优化后隧道保留岩体的损伤范围明显减小,超挖值能够稳定控制在 20 cm 范围内。李善伟等^[15]结合理论分析与数值模拟,对应力波在充填节理岩体中的传播规律展开研究,结果表明应力波会在节理之间发生多次透反射,当节理间距足够大时,能量的透反射系数会逐渐趋于稳定。种玉配等^[16]针对水平岩层隧道的结构特点,研制出 PVC 管聚能爆破装置,该装置可显著控制隧道超欠挖量,能够将大部分区域的超挖值控制在 15 cm 以下。胡桂斌^[17]设计正交试验探究了隧道爆破参数对超欠挖的影响规律,结果表明不耦合系数对超欠挖的影响程度最大。

综上所述,当前研究大多仅针对单一因素(如节理倾角、地应力或炮孔参数)对爆破效果的影响展开分析,结合切缝药包聚能爆破方法,综合考虑地应力条件、节理数量及节理几何特征对爆破质量的耦合影响的研究仍不够深入,尤其是在多因素交互作用下识别超欠挖主控因素方面,缺乏系统性研究。

为此,在前人研究的基础上,利用有限元软件构建了切缝药包作用于含多节理岩体的双孔聚能爆破模型,采用正交试验设计方法,综合考虑地应力、节理间距、节理数量、节理倾角、节理厚度和炮孔间距共 6 个因素,研究各因素对超欠挖的影响规律,并通过极差分析确定该条件下的超欠挖主控因素。研究成果对揭示多节理岩体条件下聚能爆破超欠挖的形成机制、优化爆破参数以及指导工程实践,均具有重要的理论价值与现实意义。

1 定向裂纹扩展的理论分析及模型构建

1.1 切缝药包聚能爆破理论

切缝药包是在炸药外围制作具有一定密度和强度的切缝管,炸药爆炸后产生的高温高压爆生气体高速膨胀,直接作用于切缝管,能量经切缝管表面反射后产生反射压缩波,同时会产生少量透射波;透射波经过切缝管以及切缝管与孔壁之间的环形封闭空间衰减后能量大幅降低,对非切缝方向可起到一定的护壁效果。对于切缝方向,爆炸应力波会作用于空气介质从而产生冲击波,在切缝处形成高速高压集中射流,定向作用于切缝方向的孔壁,

加之岩石的抗拉强度远小于抗压强度,切缝方向更容易产生定向张拉裂纹。随后,在爆生产物与爆生气体的共同作用下,裂纹逐步扩展,最终形成断裂破坏面^[18],具体如图1所示。

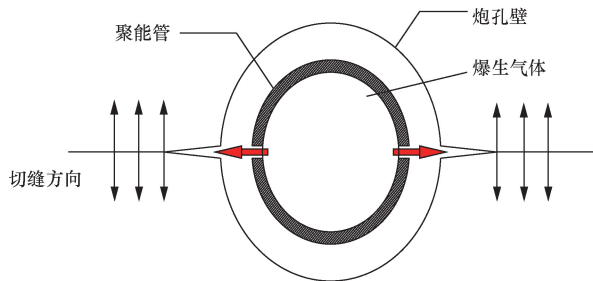


图1 切缝药包爆破力学模型
Fig.1 Mechanical model of slotted cartridge blasting

1.2 数值模型的建立

1.2.1 计算模型

采用有限元软件建立了多节理岩体双孔聚能爆破的数值模型,结合炮孔深度远大于炮孔直径的特点,为提高计算效率,可将模型简化为准三维平面问题进行分析。模型尺寸为300 cm×300 cm×1 cm,炮孔直径42 mm,炸药直径21 mm,炮孔采用不耦合装药结构,同时设置多条平行节理贯穿整个模型。模型边界设置为无反射边界,以此模拟无限域岩体;为贴合实际岩体爆破的受力情况,在模型四周施加地应力。岩石、节理和切缝管均为固体材料,采用Lagrange算法,炸药和空气为流体材料,采用Euler算法,通过流固耦合中的Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE)方法实现两类材料的耦合计算,整个计算过程采用cm-g-us单位制,计算模型如图2所示。

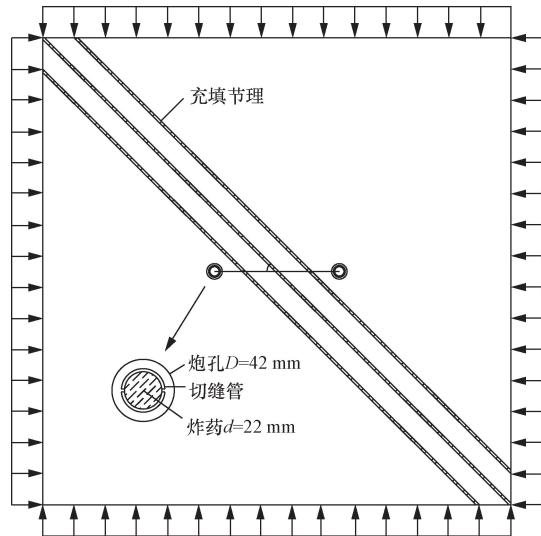


图2 双孔聚能爆破模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of double-hole shaped charge blasting model

1.2.2 材料参数

岩石材料采用HJC(Holmquist-Johnson-Cook)本构模型,应用Von Mises屈服条件准则^[19],模拟爆生裂纹的扩展。具体岩石HJC材料参数如表1所示^[20]。

炸药材料选用二号岩石乳化炸药,状态方程采用JWL,其表达式为

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}\tag{1}$$

式(1)中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为描述炸药爆轰产物膨胀过程的JWL状态方程参数; P 为爆轰产物的压力; E 为爆轰产物内能; V 为炮轰产物相对体积。具体材料参数如表2所示^[21]。

空气介质模型状态方程的表达式为

$$P=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5+C_6\mu^2)E_0\tag{2}$$

式(2)中: $C_0\sim C_6$ 为常数; P 为空气压力; μ 为空气比体积, $\mu=\rho/\rho_0-1$, ρ 为空气密度, ρ_0 为参考密度; E_0 为单位体积内能。具体材料参数如表3所示。

切缝管材料选用钢材,具体材料参数如表4所示^[22]。

表1 页岩HJC本构模型参数^[20]
Table 1 Parameters of the HJC constitutive model for shale^[20]

序号	参数	数值	序号	参数	数值
1	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.65	11	P_c/MPa	35
2	f_c/MPa	121.36	12	u_c	0.000 8
3	A	0.71	13	P_1/GPa	1.035
4	B	1.84	14	u_1	0.1
5	C	0.007	15	K_1/GPa	85
6	$S_{\max}$	5	16	K_2/GPa	-171
7	G/GPa	29.1	17	K_3/GPa	208
8	T/MPa	13.8	18	$\varepsilon_{f\min}$	0.01
9	D_1	0.045	19	N	1
10	D_2	1			

注: ρ 为材料密度; f_c 为单轴抗压强度; A 为特征化黏接强度; B 为特征化压力硬化因子; C 为应变率影响指数; $S_{\max}$ 为特征化最大强度; G 为剪切模量; T 为抗拉强度; D_1 、 D_2 为损伤常数; P_c 为破碎压力; u_c 为破碎体积应变; P_1 为压实压力; u_1 为压实体积应变; K_1 、 K_2 、 K_3 为压力常数; $\varepsilon_{f\min}$ 为断裂前最小塑性应变; N 为压力硬化指数。

表2 炸药材料参数^[21]
Table 2 Material parameters of the explosive^[21]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{ej}/GPa	A/GPa	B/GPa
1.18	5122	9.53	276.2	8.44
R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-3})$	V
5.2	2.1	0.5	0.038 7	1

注: ρ 为炸药密度; D 为爆轰波速; P_{ej} 为爆轰压力; E_0 为初始比内能; V 为相对体积。

页岩的充填节理中往往由断层泥质、岩石风化产物等软弱物质组成,因此假定充填节理为弹塑性体,具体材料参数如表 5 所示^[23]。

表 3 空气材料参数
Table 3 Material parameters of air

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3
0.001 2	0	0	0	0
C_4	C_5	C_6	E_0/MPa	相对体积
0.4	0.4	0	0.25	1.00

表 4 切缝管材料参数^[22]
Table 4 Material parameters of the slotted pipe^[22]

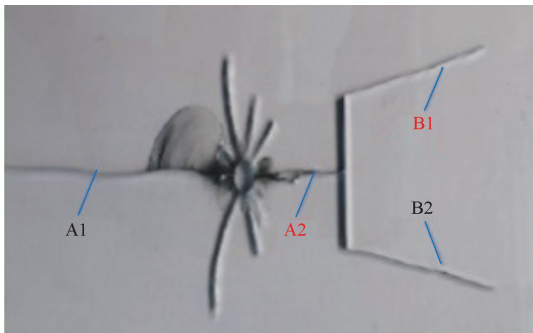
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	屈服应力/ MPa	泊松比	弹性模量/ GPa	切线模量/ MPa
8.93	400	0.35	117	100

表 5 节理材料参数^[23]
Table 5 Material parameters of the joint^[23]

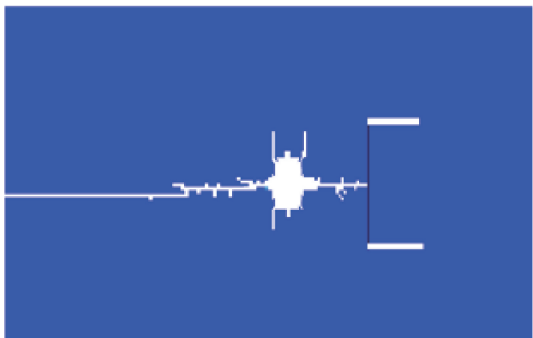
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	剪切模量/ GPa
2.5	30.0	0.3	4.0	11.5

1.3 数值模拟有效性验证

采用有限元软件对文献中所做的试验结果进行复现,验证数值模拟的可靠性。如图 3 所示为丁晨曦等^[24]采用聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 介质进行的 PMMA 爆破试验



(a) PMMA爆破试验结果



(b) 数值模拟复现结果

图 3 PMMA 爆破试验和数值模拟复现结果对比
Fig. 3 Comparison between PMMA blasting test and numerical simulation results

和数值模拟复现结果的对比,可以看出数值模拟完整再现了聚能爆破作用下 PMMA 试样定向裂纹与张开节理的相互作用,与试验结果吻合较好。

2 聚能爆破数值模拟分析及验证

2.1 正交试验数值计算方案

当爆炸应力波遇到节理时,会发生透射和反射现象,影响炮孔间裂纹的扩展。同时,炮孔间距的合理性和初始应力场的存在影响裂纹扩展,发生超欠挖现象。所以把节理间距 D 、节理数量 n 、节理倾角 θ 、节理厚度 δ 、地应力 σ 和炮孔间距 L 作为影响聚能爆破形成平整爆破轮廓线的主要因素,构建双孔聚能爆破模型。根据正交试验的定义,将上述因素作为正交试验的 6 个因素,各因素的取值依据实际工程经验及相关学者的理论分析所确定^[25-26]。具体正交试验因素水平取值如表 6 所示。

根据表 6 中各影响因素及其水平数,选取 $L_{32}(4^6)$ 正交表,如表 7 所示。本次将超欠挖量作为多节理岩体聚能爆破效果的评价指标。聚能爆破开挖原理示意图如图 4 所示:两个炮孔中心连线处会产生应力叠加效应,只有当炮孔中心连线处的 I 单元所受切向拉应力达到岩石抗拉强度时,才能形成初始裂纹,并沿着设计轮廓线方向发展贯通。设计轮廓线上方保留岩体区域内的岩石单元 II 受到斜向上的压力作用,因此岩石受到的扰动影响较小;而处于设计轮廓线下方的岩石单元 III 受到斜向下的反向拉应力作用,会发生拉裂破坏。

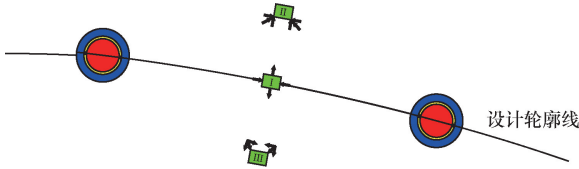


图 4 双孔聚能爆破开挖原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the energy-gathering blasting excavation principle

表 6 双孔聚能爆破正交试验因素水平表
Table 6 Factor-level table of orthogonal test for double-hole shaped charge blasting

水平	地应力/ MPa	炮孔间 距/cm	节理厚 度/mm	节理倾角 (节理面与 炮孔连线 夹角)/($^{\circ}$)	节理 数量	节理间 距/cm
1	0	60	2	30	2	15
2	4	80	4	45	3	20
3	8	100	6	60	4	25
4	12	120	8	90	5	30

表7 双孔聚能爆破正交试验设计表
Table 7 Orthogonal test design table for double-hole shaped charge blasting

因素水平						
试验组	地应力	炮孔间距	节理厚度	节理倾角	节理数量	节理间距
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	4	4
3	1	2	3	4	1	2
4	1	2	4	3	4	3
5	1	3	1	3	2	4
6	1	3	2	4	3	1
7	1	4	3	2	2	3
8	1	4	4	1	3	2
9	2	1	3	4	3	4
10	2	1	4	3	2	1
11	2	2	1	1	3	3
12	2	2	2	2	2	2
13	2	3	3	2	4	1
14	2	3	4	1	1	4
15	2	4	1	3	4	2
16	2	4	2	4	1	3
17	3	1	3	1	4	2
18	3	1	4	2	1	3
19	3	2	1	4	4	1
20	3	2	2	3	1	4
21	3	3	3	3	3	3
22	3	3	4	4	2	2
23	3	4	1	2	3	4
24	3	4	2	1	2	1
25	4	1	1	4	2	3
26	4	1	2	3	3	2
27	4	2	3	1	2	4
28	4	2	4	2	3	1
29	4	3	1	2	1	2
30	4	3	2	1	4	3
31	4	4	3	3	1	1
32	4	4	4	4	4	4

2.2 正交数值模拟试验结果分析

正交模拟试验得到的超欠挖量结果如表8所示,对表8中的试验数据进行极差分析后,可根据爆破产生的超欠挖量判断各影响因素的重要程度,能够为多节理岩体的聚能爆破设计提供依据,超欠挖量越小,代表聚能爆破效果越好。

超欠挖量影响因素分析结果如表9所示,而不同水平因素作用下多节理岩体双孔聚能爆破超欠挖量的极差情况如图5所示。从R值可以看出,影响超欠挖量最大因素是地应力 σ ,其他影响因素由大到小依次是:炮孔间距 L 、节理间距 D 、节理数量 n 、节理倾角 θ 、节理厚度 δ 。

从图5中可以看出超欠挖量与地应力呈负相关,地应力直接决定岩体初始应力状态,会对爆破产生的应力波传播以及爆生裂纹扩展过程中起到明

表8 正交模拟试验超欠挖量结果
Table 8 Over-under-excavation results of orthogonal simulation test

试验组	超欠挖量/cm ²	试验组	超欠挖量/cm ²
1	259.2	17	22.6
2	359.3	18	165.8
3	256.0	19	-118.7
4	329.1	20	-51.3
5	272.6	21	58.2
6	176.3	22	44.7
7	126.4	23	-62.8
8	92.3	24	-82.5
9	27.6	25	96.4
10	53.8	26	118.4
11	113.2	27	58.4
12	109.3	28	77.6
13	-58.1	29	-106.5
14	146.3	30	-118.7
15	-104.7	31	-137.6
16	-77.6	32	-148.5

注:正值表示超挖量,负值表示欠挖量。

表9 超欠挖量影响因素极差分析结果
Table 9 Range analysis results of influencing factors on over-under-excavation

因素	地应力 σ /MPa	炮孔间距 L /cm	节理厚度 δ /mm	节理倾角 θ	节理数量 n /条	节理间距 D /cm
k_1	233.91	137.89	43.59	67.33	20.30	86.61
k_2	26.23	96.71	54.15	76.38	56.79	75.20
k_3	-3.00	51.85	44.19	61.35	75.10	54.01
k_4	-20.06	-49.38	87.94	25.03	84.89	21.25
R	253.98	187.26	44.35	51.35	64.59	65.36

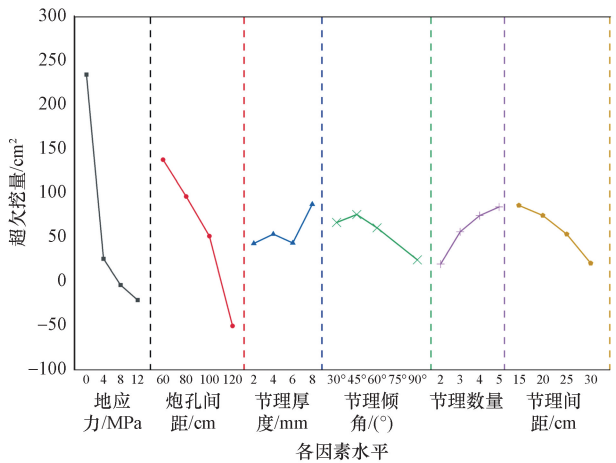


图5 不同水平因素下超欠挖量

Fig. 5 Over-under-excavation under different factor levels

显的约束作用,对多节理岩体聚能爆破产生的超欠挖量影响远强于炮孔间距和节理特征,故常为首要影响因素。

其次为炮孔间距,炮孔间距直接影响爆破作用范围,是人为可调控的关键参数,间距过小,相邻炮孔的

爆破应力波会过度叠加,容易产生超挖,间距过大,可能因爆破能量不足而不能贯通多条节理,容易出现欠挖,其影响程度高于岩体自身节理条件。

在岩体的节理特征因素中,节理间距是影响超欠挖量的主要因素,节理间距反映岩体中节理的分布疏密情况,节理间距越小,意味着岩体被节理分割的程度越大,导致岩体完整性及稳定性就越低,容易产生超挖。

2.2.1 地应力对超欠挖量影响因素分析

为进一步揭示地应力作用下爆生裂纹扩展机制,分析了爆破过程中炮孔周围受地应力作用产生应力集中的现象。在爆破过程中,岩体中的地应力远小于爆破产生的冲击波压力,地应力对爆破压碎区的形成影响不大。随着爆破冲击波衰减为应力波,岩石破碎块在应力波作用下径向向外推,从而产生环向拉应力。由于岩石的动态抗拉强度远低于动态抗压强度,从而产生径向裂缝。所以在裂纹区由地应力的作用所产生的环向应力场影响着裂纹的扩展。因此,有必要对地应力产生的环向应力进行分析。

在双向应力作用下弹性介质中,圆孔孔口应力集中的极坐标静力分布可由 Kirsch 解确定,其表达式为

$$\sigma_{rr}^s = \frac{p_x + p_y}{2} \left(1 - \frac{\alpha^2}{r^2} \right) + \left(1 - \frac{\alpha^2}{r^2} \right) \left(1 - \frac{3\alpha^2}{r^2} \right) \times \left(\frac{p_x - p_y}{2} \cos 2\theta \right) \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^s = \frac{p_x + p_y}{2} \left(1 + \frac{\alpha^2}{r^2} \right) - \left(1 + \frac{3\alpha^4}{r^4} \right) \times \left(\frac{p_x - p_y}{2} \cos 2\theta \right) \quad (4)$$

$$\tau_{r\theta}^s = \left(1 - \frac{\alpha^2}{r^2} \right) \left(1 + \frac{3\alpha^2}{r^2} \right) \left(\frac{p_y - p_x}{2} \sin 2\theta \right) \quad (5)$$

式中: σ_{rr}^s 、 $\sigma_{\theta\theta}^s$ 和 $\tau_{r\theta}^s$ 分别为单元径向应力、单元环向应力和单元切应力; α 为炮孔半径; r 为目标岩体到炮孔中心的距离; p_x 为水平方向应力; p_y 为竖直方向应力。

地应力条件下炮孔壁环向应力分布曲线如图 6 所示,呈圆形分布^[27]。通过式可得到环向应力理论解,根据不同地应力工况输出模拟环向应力值,并与环向应力理论解进行对比,验证地应力施加是否准确。输出的孔壁单元应力值与理论解的对比分析、求解误差如表 10 所示。

通过对比分析,理论计算值和数值模拟值之间误差较小,证明了地应力施加的准确性,环向应力的合理性。

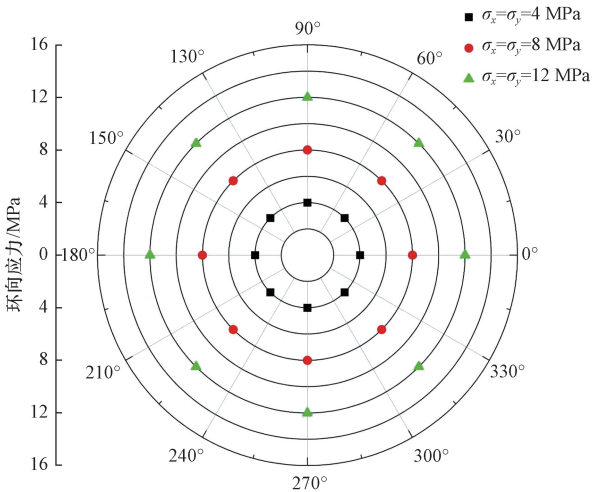


图 6 孔壁环向应力分布曲线

Fig. 6 Hoop stress distribution curve on the borehole wall

表 10 环向应力理论值与模拟值对比

Table 10 Comparison between theoretical and simulated values of hoop stress

P_x /MPa	P_y /MPa	理论解/MPa	数值模拟值/MPa	误差/%
4	4	8	7.569	5.38
8	8	16	15.16	5.25
12	12	24	22.74	5.25

为进一步探究地应力大小对超欠挖量的影响,固定节理倾角 90°、节理厚度 4 mm、节理间距 15 cm、节理数量 3 条和炮孔间距 80 cm 不变,改变地应力大小,分别取值 0、4、8、12 MPa,以此建立 4 个模型,可得不同地应力条件下双孔聚能爆破超欠挖量的示意图,如图 7 所示。以炮孔中心连线为设计轮廓线,上部为保留岩体,统计炮孔中心连线上方的面积,比较炮孔间距变化的开裂区面积。

由图 8 可知,地应力与超挖量成负相关,当地应力大于 8 MPa 时,地应力对爆破裂纹抑制作用较强,阻碍了爆破能量推动爆生裂纹穿透多条节理,导致炮孔间的裂纹不能穿透多条节理实现贯通。当地应力小于 4 MPa 时,爆生裂纹受地应力抑制作用较小,节理面的约束作用相对凸显。聚能爆破产生的应力波遇到节理面时,更容易在节理面处发生反射和透射等现象,节理面为 90°时,爆破裂纹受节理面角度影响较小,更易穿过多条节理出现超挖量较大的情况。当地应力为 4 MPa 时,既没有过度抑制爆生裂纹的扩展,又能为裂纹扩展提供一定的定向引导,可以保证炮孔间裂纹穿透多条节理实现贯通,形成较为平整的爆破轮廓线。

故当地应力为 4 MPa 左右时,多节理页岩中将炮孔直径设置为 42 mm、炸药直径为 21 mm、孔间距设置在 80 cm 对隧道超欠挖控制有显著效果,并确保聚能爆破裂纹贯穿多条节理实现炮孔间贯通。

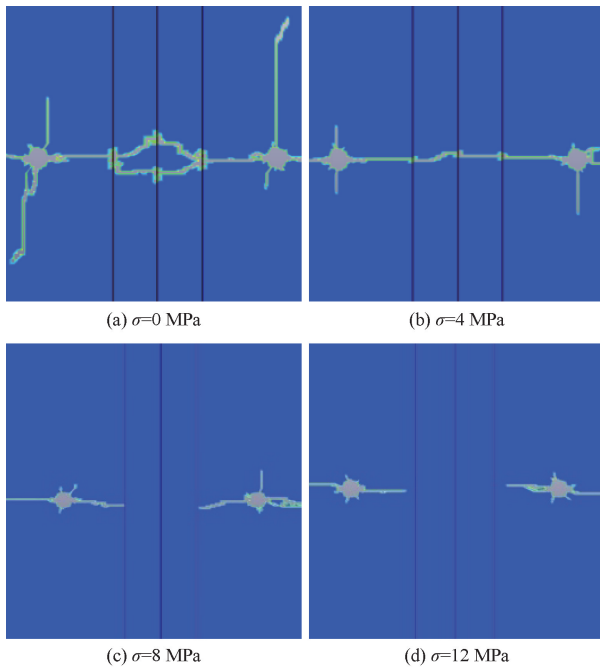


图7 不同地应力下聚能爆破效果图

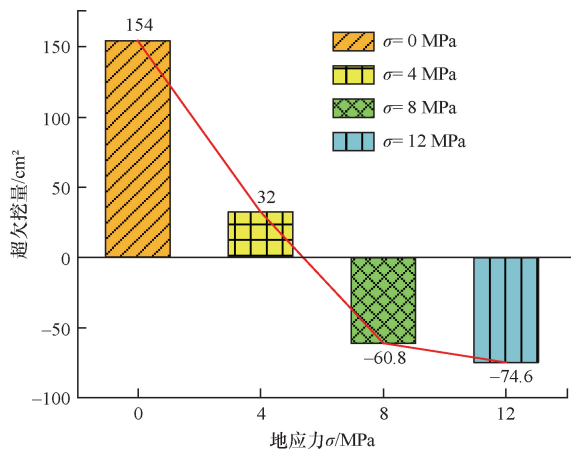
Fig. 7 Diagram of shaped charge blasting effect under different *in-situ* stresses

图8 不同地应力下超欠挖量统计图

Fig. 8 Statistics diagram of over-under-excavation under different *in-situ* stresses

2.2.2 炮孔间距对超欠挖量影响因素分析

为进一步探究炮孔间距对超欠挖量的影响,建立仅改变炮孔间距的双孔聚能爆破模型,炮孔间距分别取 60、80、100、120 cm,地应力为 4 MPa。可得不同孔间距下双孔聚能爆破超欠挖量示意图,如图 9 所示,超欠挖统计量如图 10 所示。

上述工况中,当孔距为 60、80 cm 时,炮孔间的应力波可以实现有效叠加,促使爆生裂纹穿透节理,最终获得的超挖量较小。当炮孔间距增大后,爆破应力波在炮孔间的传递与叠加效果会逐渐减弱,难以推动爆生裂纹完全穿透多条节理并实现贯通,

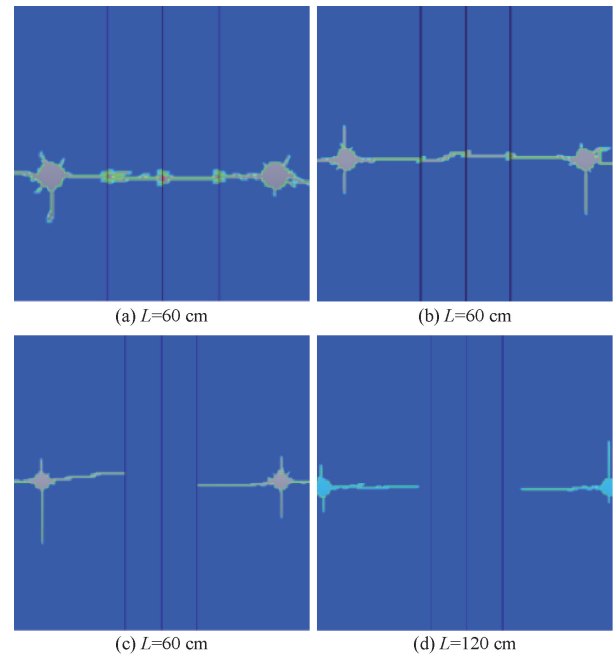


图9 不同炮孔间距聚能爆破效果图

Fig. 9 Diagram of shaped charge blasting effect with different borehole spacings

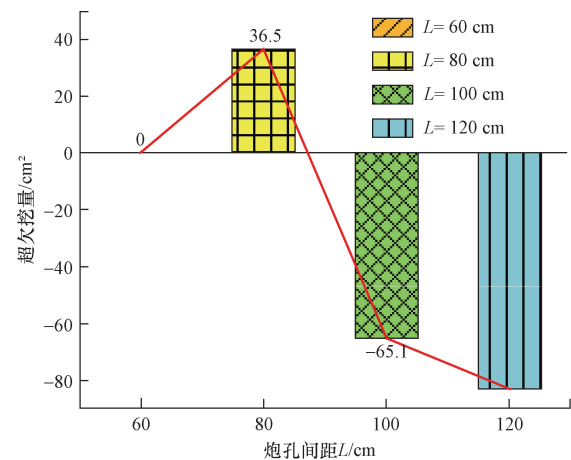


图10 不同炮孔间距超欠挖量统计图

Fig. 10 Statistics diagram of over-under-excavation for different borehole spacings

进而导致部分区域岩石未被充分破碎,引发欠挖问题。因此,在地应力为 4 MPa、炮孔直径为 42 mm、炸药直径为 21 mm 的条件下,多节理页岩聚能爆破开挖选择 60 ~ 80 cm 的炮孔间距,对隧道超欠挖控制有显著效果。结合已有实际施工经验^[28],当炮孔直径处于 35 ~ 45 mm 时,将炮孔间距取为炮孔直径的 10 ~ 20 倍效果。

2.2.3 节理间距对超欠挖量影响因素分析

为进一步探究节理间距的变化对超欠挖量的影响,节理间距设置为 15、20、25、30 cm,节理倾角设置为 60°,炮孔间距为 80 cm,地应力为 4 MPa。以

此建立 4 个模型,爆破效果如图 11 所示。不同节理间距超欠挖量如图 12 所示。

由图 12 可知,节理间距与超挖量呈负相关。当节理间距增大,超挖量减小。节理间距反映岩体中节理的分布疏密情况,节理间距越小,意味着岩体被节理分割的程度越大,导致岩体完整性及稳定性就越低。节理间距较小时,爆破应力波在节理面之间频繁反射与透射,爆破裂纹受节理面的影响,随机扩展。容易产生超挖。超挖量达到 126 cm^2 左右。当节理间距增大,岩体完整性及稳定性增强,爆破应力波在节理间的传播距离增加。节理对裂纹的引

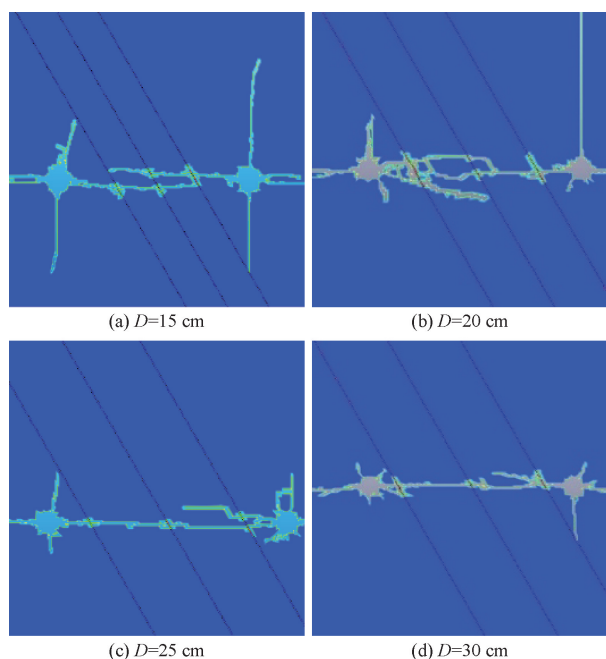


图 11 不同节理间距聚能爆破效果图

Fig. 11 Diagram of shaped charge blasting effects under different joint spacing conditions

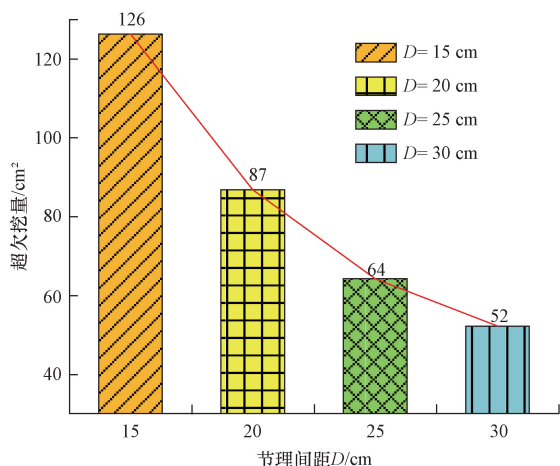


图 12 不同节理间距下超欠挖量统计图

Fig. 12 Statistics diagram of over-under-excavation under different joint spacing conditions

导作用减弱,大部分爆破裂纹沿聚能方向进行扩展,超挖量减小。节理间距为 30 cm 时,超挖量降至 52 cm^2 左右。

因此,在地应力 4 MPa 的条件下,针对多节理页岩采用聚能爆破方式,炮孔直径设置为 42 mm,炸药直径为 21 mm,并将炮孔间距设置为 80 cm 左右,较大的节理间距有利于爆破能量集中传递,可实现爆破裂纹的定向扩展,从而显著提升超欠挖控制效果。

2.3 聚能爆破效果验证

结合有限元数值模拟与正交试验法,系统深入分析了多节理岩体隧道聚能爆破中超欠挖现象的关键影响因素。由于本阶段研究以理论值与模拟值的对比验证为主,尚未开展现场工程实践,为验证本文数值模拟的有效性,选取地质条件相似的隧道爆破超欠挖控制成功案例作为间接支撑。

Hong 等^[29]通过地下隧道爆破相似模型测试系统结合数值模拟,研究了地应力对隧道爆破超欠挖量的影响,发现地应力增大会显著减小超挖量;高地应力会抑制裂纹扩展,更容易引发欠挖;低地应力则会加剧围岩损伤,进而导致超挖;伍军^[14]针对泉州市德化县龙浔镇瓷都隧道的爆破超挖量控制项目,结合数值仿真对 60° 节理倾角条件下的隧道周边孔参数进行优化,发现减小炮孔间距可以有效控制超挖量,应用该优化方案后,项目的平均超挖量降低了 65.25%;张凯等^[30]研究了巴岳山隧道节理岩体的爆破效果,对节理与周边孔连线呈不同夹角时的周边孔参数进行优化后,爆破后的平均超挖值可控制在 18 cm 以内。Berisavljević 等^[31]以长度 12 km 的水电站压力隧道为研究对象,分析了节理间距对隧道爆破超欠挖的影响,研究证实:节理间距与超欠挖量呈显著负相关,节理间距增大时,岩体完整性提升,不稳定楔体数量减少,爆破应力波传播更均匀,进而使得超欠挖量显著减小,隧洞开挖轮廓也更规整。

上述案例与本研究结论相互契合,不仅验证了本研究结论的合理性与可靠性,也为多节理岩体隧道爆破超挖控制提供了坚实的工程实践支撑。

3 结论

针对聚能爆破质量的影响因素展开分析,主要采用正交试验分析法,开展了多节理与地应力条件下岩石双孔聚能爆破的数值试验,得到如下主要结论。

(1)通过极差分析确定,影响超欠挖量的首要因素为地应力。地应力直接决定岩体的初始应力状态,其大小会影响爆破裂纹的扩展;当地应力大

于 8 MPa 时,炮孔间裂纹无法穿透多条节理实现贯通,会出现欠挖情况;当地应力小于 4 MPa 时,爆破对围岩的损伤影响较大,会出现超挖情况。当地应力为 4 MPa,炮孔直径设置为 42 mm,炸药直径为 21 mm 时,既不过度抑制爆生裂纹的扩展,又能为裂纹扩展提供一定的定向引导,可以保证炮孔间裂纹穿透多条节理实现贯通,形成较为平整的爆破轮廓线。

(2)影响超欠挖量的次要因素为炮孔间距。炮孔间距直接影响爆破作用范围,是人为可控的关键参数:孔间距过小容易造成超挖,孔间距过大容易造成欠挖。在 4 MPa 地应力条件下,当聚能爆破孔距为 60、80 cm 时,相邻炮孔间岩体损伤范围小,能有效控制超欠挖现象。

(3)在岩体的节理特征因素中,节理间距是影响超欠挖量的主要因素。节理间距越小,岩体被节理分割的程度越大,岩体完整性与稳定性就越低,爆破裂纹受节理面影响发生随机扩展,更容易产生超挖;将炮孔间距设置为 80 cm 左右时,较大的节理间距有利于爆破能量集中传递,可实现爆破裂纹的定向扩展,减少超欠挖现象,形成较为平整的爆破轮廓线。

参 考 文 献

- [1] 杨仁树. 定向断裂控制爆破理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Yang Renshu. Theory and practice of directional fracture controlled blasting[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] Xu S X, Wu B, Zhang H L, et al. Directional crack propagation and optimization strategies for multi-hole shaped charge blasting in tunnel construction[J]. Structures, 2025, 72: 108268.
- [3] 杨洪印. 多节理隧道聚能爆破与光面爆破效果超欠挖比较研究[J]. 铁道建筑技术, 2025(5): 158-162.
Yang Hongyin. Comparative study on the effect of cumulative blasting and smooth blasting in multi-joint tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2025(5): 158-162.
- [4] 李兴全, 王建国, 支有, 等. 隧道掘进新型聚能水压光面爆破技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2024.
Li Xingquan, Wang Jianguo, Zhi You, et al. New shaped charge water pressure smooth blasting technology for tunnel driving[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2024.
- [5] 任士房, 余潭秋, 张寰宇, 等. 聚能水压光面爆破在深埋长大隧道破碎岩体中的应用效果研究[J]. 土工基础, 2024, 38(3): 387-393.
Ren Shifang, Yu Tanqiu, Zhang Huanyu, et al. Application effect of energy-gathering hydraulic smooth blasting in deep-buried long tunnel with fractured rock mass[J]. Geotechnical Foundation, 2024, 38(3): 387-393.
- [6] Luo X Y, Yu Q Y, Yin S X, et al. Blasting damage control in jointed rock tunnels: a review with numerical validation of water-pressure blasting[J]. Applied Sciences, 2025, 15(24): 13187.
- [7] 马泗洲, 蒋海明, 周朝兰, 等. 围压与爆破耦合作用下节理岩体裂纹的扩展行为与影响因素[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(6): 6-23.
Ma Sizhou, Jiang Haiming, Zhou Chaolan, et al. Investigation on cracking behavior and influencing factors of jointed rock masses under the coupling effect of confining pressure and blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(6): 6-23.
- [8] Li J X, Wu W, Pan B Y, et al. Impact of joint distribution within hard rock mass on tunnel blasting profile: numerical simulation and field measurement[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025, 185: 106098.
- [9] Wang J X, Cao A S, Liu J X, et al. Numerical simulation of rock mass structure effect on tunnel smooth blasting quality: a case study[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22): 10761.
- [10] Rong H, Li N N, Cao C, et al. Numerical simulation of rock blasting under different *in-situ* stresses and joint conditions[J]. PloS One, 2024, 19(4): e0299258.
- [11] Huang J H, Li X P, Luo Y, et al. Numerical simulation of influence of filled joint on the crack formed by notch hole blast[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24(4): 423-439.
- [12] 李国庆, 陶铁军, 刘霞, 等. 地应力作用下节理岩体隧道爆破孔网布设方法研究[J]. 爆破, 2023, 40(3): 59-67.
Li Guoqing, Tao Tiejun, Liu Xia, et al. Research on blasting hole network layout method for jointed rock mass tunnel under geostress[J]. Blasting, 2023, 40(3): 59-67.
- [13] 刘浩杉, 王建国, 宋永康, 等. 高地应力下随机节理岩体单孔爆破响应特征模拟研究[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(1): 133-144.
Liu Haoshan, Wang Jianguo, Song Yongkang, et al. Numerical investigation of single-hole blasting response in randomly jointed rock masses under high *in-situ* stress[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(1): 133-144.
- [14] 伍军. 节理岩体隧道周边孔爆破参数优化及超挖控制研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(9): 147-150.
Wu Jun. Research on parameter optimization of perimeter hole blasting and overbreak control in jointed rock mass tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2024(9): 147-150.
- [15] 李善伟, 刘亚强, 贾帅龙, 等. 应力波在节理岩体中的传播特性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(30): 13091-13100.
Li Shanwei, Liu Yaqiang, Jia Shuailong, et al. Propagation characteristics of stress waves in jointed rock mass[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(30): 13091-13100.
- [16] 种玉配, 齐燕军, 刘书奎. PVC 管聚能爆破法在水平砂泥岩隧道中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 116-120.
Zhong Yupei, Qi Yanjun, Liu Shukui. Application of PVC pipe energy-gathering blasting method in horizontal sand-mudstone tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(3): 116-120.
- [17] 胡桂斌. 夹泥灰岩隧道爆破参数对超欠挖的影响研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(2): 78-87.
Hu Guibin. Study on the influence of blasting parameters on overbreak-underbreak in argillaceous limestone tunnel[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(2): 78-87.
- [18] 孙博闻, 郭建, 李斌, 等. 预应力条件下不耦合装药系数对爆轰聚能效果的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2024, 24

- (10): 4048-4055.
- Sun Bowen, Guo Jian, Li Bin, et al. Numerical simulation of the effect of decoupling charge coefficient on explosive energy-gathering under prestress conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(10): 4048-4055.
- [19] 张雨晨, 王海亮, 石晨晨, 等. 隧道爆破下邻近管道动力响应的数值模拟[J]. 工程爆破, 2023, 29(3): 95-105.
- Zhang Yuchen, Wang Hailiang, Shi Chenchen, et al. Numerical simulation of dynamic response of adjacent pipelines under tunnel blasting[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(3): 95-105.
- [20] 田怡萍. 页岩爆燃压裂下裂缝扩展模式数值模拟研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.
- Tian Yiping. Numerical simulation study on fracture propagation patterns under shale combustion fracturing[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.
- [21] Li X H, Zhu Z M, Wang M, et al. Numerical study on the behavior of blasting in deep rock masses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2021, 113: 103968.
- [22] 颜天成. 环向聚能爆破机理及预处理高强孤石应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- Yan, Tiancheng. Research on the mechanism of circular energy-gathering blasting and its application in pre-treating high-strength boulders[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022.
- [23] 丁黄平. 节理裂隙岩体隧道爆破成型效果研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- Ding Huangping. Study on blasting formation effect of tunnel in jointed and fractured rock mass [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [24] 丁晨曦, 杨仁树, 陈程, 等. 切缝药包爆破定向裂纹与张开节理相互作用的实验研究[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7): 894-902.
- Ding Chenxi, Yang Renshu, Chen Cheng, et al. Experimental study on the interaction between directional cracks from slit charge blasting and open joints [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 894-902.
- [25] 刘婷婷, 李新平, 李海波, 等. 应力波在充填节理岩体中传播规律的数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3552-3560.
- Liu Tingting, Li Xinping, Li Haibo, et al. Numerical study on stress wave propagation across rock masses with filled joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3552-3560.
- [26] Zou B P, Xu Z P, Wang J X, et al. Numerical investigation on influential factors for quality of smooth blasting in rock tunnels [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 98: 54313.
- [27] 王凯飞, 张昌锁, 郝兵元, 等. 高地力环境下聚能爆破动、静作用对岩石内裂纹起裂与扩展机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 50-64.
- Wang Kaifei, Zhang Changsuo, Hao Bingyuan, et al. Study on mechanism of rock crack initiation and propagation under dynamic and static effects of energy-gathering blasting in high geostress environment[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 50-64.
- [28] 王海亮. 工程爆破[M]. 2版. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- Wang Hailiang. Engineering blasting [M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [29] Hong Z X, Tao M, Zhao R, et al. Investigation on overbreak and underbreak of pre-stressed tunnels under the impact of decoupled charge blasting[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 182: 104784.
- [30] 张凯, 陶铁军, 田兴朝, 等. 节理岩体隧道爆破周边孔分区布设方法与应用研究[J]. 爆破, 2024, 41(4): 107-115, 121.
- Zhang Kai, Tao Tiejun, Tian Xingchao, et al. Research on zoning layout method and application of contour holes for blasting of jointed rock mass tunnel[J]. Blasting, 2024, 41(4): 107-115, 121.
- [31] Berisavljević Z, Bajić D, Jovičić V. Development and application of methodology for quantification of overbreaks in hard rock tunnel construction[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1379.